

УДК 621.7.06

## Исследование зависимости момента трения магнитожидкостного устройства от величины рабочего зазора

В.А. Полетаев, И.М. Арефьев, Ю.Б. Казаков, Т.А. Пахолкова  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** На момент трения магнитожидкостного устройства влияет величина рабочего зазора. В настоящее время недостаточно результатов исследований зависимости моментов трения от величины шероховатости поверхностей полюсов и втулки, контактирующих с магнитной жидкостью разного типа. Данные вопросы мало изучены и актуальны для исследования.

**Материалы и методы:** Исследования проводились на специальной экспериментальной установке, позволяющей использовать втулки и постоянные магниты из разных материалов. Поверхности сменных магнитопроводящих втулок вала обработаны при различных технологических режимах в целях получения различной величины их шероховатости и исследованы с помощью профилометра-профилографа.

**Результаты:** Показано влияние величины шероховатости поверхностей деталей рабочего зазора на момент трения магнитожидкостного устройства. Установлено, что чем выше величина шероховатости Ra поверхности втулки, контактирующей с магнитной жидкостью в магнитном поле, тем значительнее момент трения во всем диапазоне исследования скорости вращения вала от 500 до 3000 об/мин.

**Выводы:** Рост шероховатости поверхностей магнитопроводящих деталей, контактирующих с магнитной жидкостью в магнитном поле, приводит к увеличению сил взаимодействия между магнитной жидкостью и поверхностями деталей. Учет данного фактора при проектировании позволит снизить энергетические потери магнитожидкостных устройств, повысить передаваемые моменты посредством магнитной жидкости.

**Ключевые слова:** шероховатость, магнитное поле, момент трения, магнитожидкостное устройство.

## Investigation of the working gap influence on the friction torque of magnetic fluid devices

V.A. Poletaev, I.M. Arefyev, Yu.B. Kazakov, T.A. Pakholkova  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

### Abstract

**Background:** Friction torque of a magnetic fluid device depends on the working gap value. At present there is not enough data on the influence of the surface roughness of the poles and bushing, which are in contact with magnetic fluids of different types, on the friction torque. Therefore, these problems are studied poorly and require further investigation.

**Materials and Methods:** The study included a special experimental setup, allowing the use of bushings and permanent magnets made of different materials. The surface of removable magnetically conductive shaft bushings was processed at different modes in order to obtain different values of roughness and studied using a profilometer-profilograph.

**Results:** The research has revealed the influence of the working gap parts surface roughness on the friction torque of a magnetic fluid device. It was found that the bigger is the roughness value Ra of the bushing surface being in contact with the magnetic fluid in magnetic field, the higher is the friction torque throughout the studied range of the shaft rotation speed of 500-3000 rpm.

**Conclusions:** A growth of the surface roughness of magnetically conductive parts being in contact with the magnetic fluid in magnetic field increases the interaction forces between the magnetic fluid and the part surfaces. Taking account of this factor in the design will reduce energy losses of magnetic fluid devices, increase the torque passed by magnetic fluids.

**Key words:** surface roughness, magnetic field, friction torque, magnetic fluid device.

Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой коллоидные системы однодоменных магнитных частиц (дисперсная фаза), диспергированных в жидкости-носителе (дисперсионная среда) [1–3]. Сочетание свойств магнитного материала и жидкости, не встречающееся в известных природных материалах, открыло широкие перспективы для создания технических устройств с магнитной жидкостью в качестве рабо-

чего тела. Эффективность инженерного приложения магнитных жидкостей оценивается по достижению ими основных технических характеристик: намагниченности насыщения, вязкости, плотности, диапазона рабочих температур, вакуумных свойств и др. Однако главным критерием качества магнитной жидкости и возможности ее применения является коллоидальная стабильность МЖ. Прежде чем приступить к испытанию

конкретных электромеханических устройств с магнитными жидкостями в реальных условиях их эксплуатации, необходимо определить, являются ли МЖ стабильными во времени без воздействия со стороны внешних факторов.

В качестве образцов исследования использовались МЖ на основе керосина (МКК 001-60), силоксановой жидкости (МКС 350-40) и синтетического углеводородного масла (МКУ 030-40). Данные магнитные жидкости обладают разными техническими характеристиками, что обусловлено их использованием, например, в датчиках угла наклона (МКК 001-60), в магнитожидкостных уплотнениях (МКС 350-40), в демпферах и в качестве магнитных смазок (МКУ 030-40). Плотность МЖ измерялась по ГОСТ 18995.1-73, пластическая вязкость МЖ – по ГОСТ 26581-85 на вискозиметре «Реотест-2», намагниченность насыщения МЖ – баллистическим методом.

Технические характеристики магнитных жидкостей представлены в таблице.

В магнитожидкостных герметизаторах стремятся к снижению момента трения, определяющего внутренние тепловыделения и разогрев устройства. Ставится задача исследовать влияние на момент трения магнитожидкостного устройства величины шероховатости поверхностей сменных втулок и полюсов, образующих рабочий зазор устройства и контактирующих с магнитной жидкостью.

Для определения влияния величины шероховатости на момент трения магнитожидкостного устройства была спроектирована и изготовлена установка [4, 5]. Магнитная жидкость размещается равномерно в рабочем зазоре с однородным магнитным полем между сменными полюсами и сменной втулкой. Источником магнитного поля являются цилиндрические постоянные магниты, равномерно размещенные по окружности между полюсами из стали 3. Вал приводится в движение электродвигателем с регулируемой скоростью вращения. Исследования проводились с магнитными жидкостями типов МКС-350-40, МКС-003-60, МКА-1-40, МКА-1-30, МКА-1-25.

На рис. 1, 2 представлены зависимости моментов трения от частоты вращения втулок из стали 3 с разными величинами шероховатости поверхности  $R_a$  для различных типов магнитной жидкости. Использовались редкоземельные магниты типа ИЖКГ из материала ЮНДКТ5БА диаметром 10 мм с индукцией  $\geq 0,5$  (Тл) и коэрцитивной силой  $\geq 120$  (кА/м).

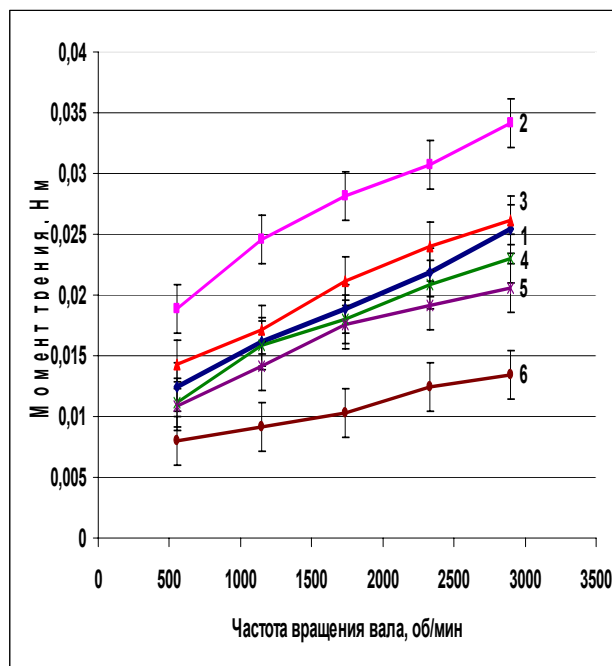


Рис. 1. Зависимость моментов трения от частоты вращения втулок из стали 3 при величине шероховатости поверхности  $R_a = 7,210$  мкм для разных типов магнитной жидкости: 1 – МКС-350-40; 2 – МКС-003-60; 3 – МКА-1-40; 4 – МКА-1-30; 5 – МКА-1-25; 6 – без магнитной жидкости

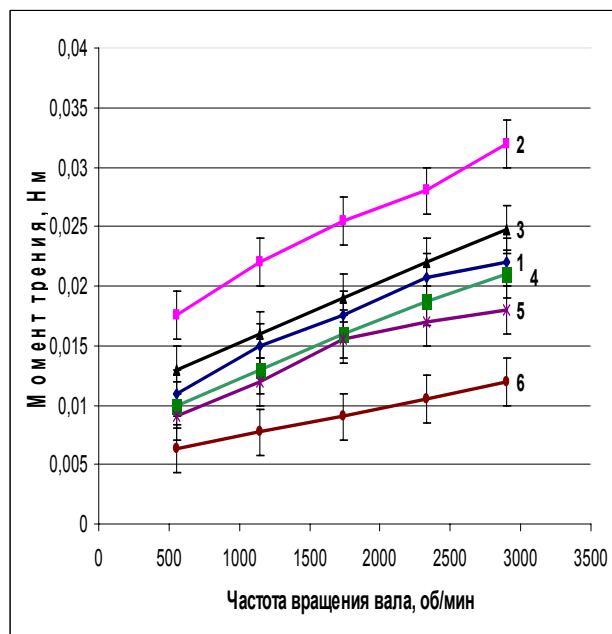


Рис. 2. Зависимость моментов трения от частоты вращения втулок из стали 3 при величине шероховатости поверхности  $R_a = 0,354$  мкм для разных типов магнитной жидкости: 1 – МКС-350-40; 2 – МКС-003-60; 3 – МКА-1-40; 4 – МКА-1-30; 5 – МКА-1-25; 6 – без магнитной жидкости

**Технические характеристики магнитных жидкостей после первой коагул**

Марка МЖ	Намагниченность насыщения, кА/м	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пластическая вязкость, Па·с
МКК 001-60	34	1,12	0,0016
МКК 001-60	84	1,74	0,021
МКС 350-40	17	1,14	0,64
МКС 350-40	39	1,43	1,67
МКУ 030-40	26	1,17	0,09
МКУ 030-40	44	1,42	0,35

На рис. 3, 4 показаны зависимости моментов трения от частоты вращения втулок из стали 3 с разными величинами шероховатости поверхности Ra для различных типов магнитной жидкости. При исследованиях использовались магниты типа ЕАЖИ из материала феррит стронция диаметром 15 × 4 мм с индукцией ≥ 0,3 (Тл) и коэрцитивной силой ≥ 158 (кА/м).

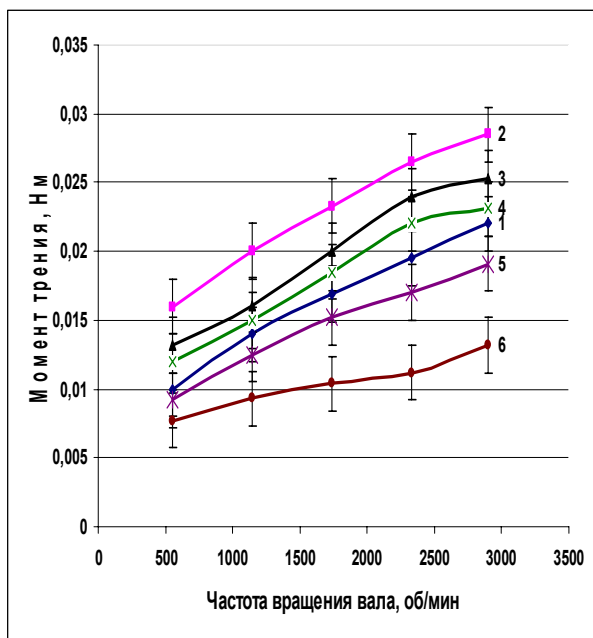


Рис. 3. Зависимость моментов трения от частоты вращения втулок из стали 3 при величине шероховатости поверхности Ra = 7,210 мкм для разных типов магнитной жидкости: 1 – МКС-350-40; 2 – МКС-003-60; 3 – МКА-1-40; 4 – МКА-1-30; 5 – МКА-1-25; 6 – без магнитной жидкости

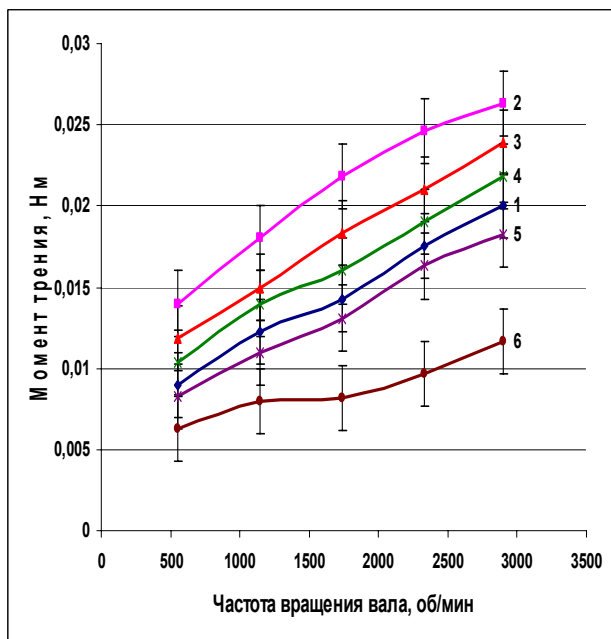


Рис. 4. Зависимость моментов трения от частоты вращения втулок из стали 3 при величине шероховатости поверхности Ra = 0,354 мкм для разных типов магнитной жидкости: 1 – МКС-350-40; 2 – МКС-003-60; 3 – МКА-1-40; 4 – МКА-1-30; 5 – МКА-1-25; 6 – без магнитной жидкости

На рис. 5, 6 показаны зависимости моментов трения от частоты вращения втулок из стали 3 с разными величинами шероховатости поверхности Ra для различных типов магнитной жидкости. Использовались магниты типа ИЖКГ из материала феррит стронция диаметром 20 мм с индукцией ≥ 0,3 (Тл) и коэрцитивной силой ≥ 185 (кА/м).

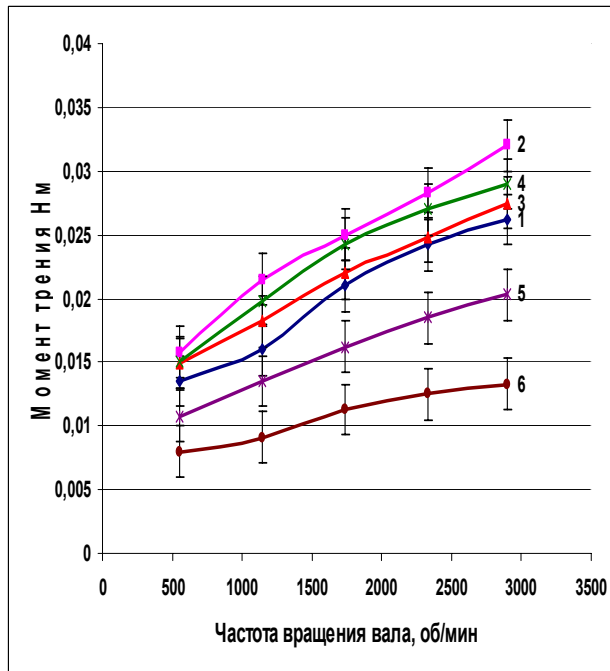


Рис. 5. Зависимость моментов трения от частоты вращения втулок при величине шероховатости поверхности Ra = 7,210 мкм для разных типов магнитной жидкости: 1 – МКС-350-40; 2 – МКС-003-60; 3 – МКА-1-40; 4 – МКА-1-30; 5 – МКА-1-25; 6 – без магнитной жидкости

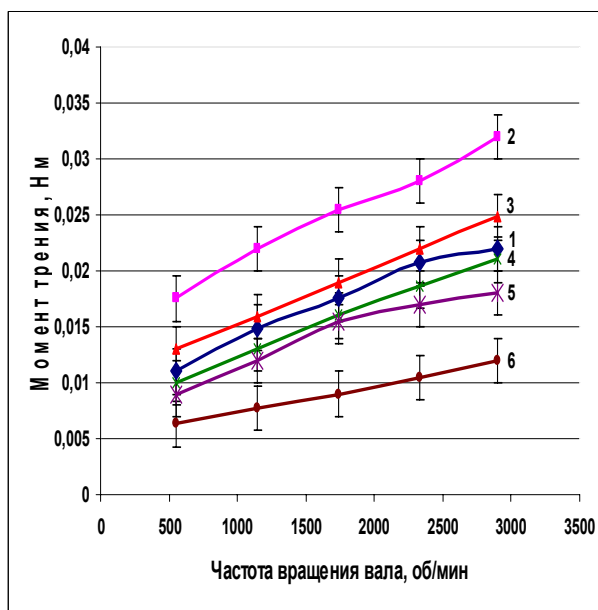


Рис. 6. Зависимость моментов трения от частоты вращения втулок при величине шероховатости поверхности Ra = 0,354 мкм для разных типов магнитной жидкости: 1 – МКС-350-40; 2 – МКС-003-60; 3 – МКА-1-40; 4 – МКА-1-30; 5 – МКА-1-25; 6 – без магнитной жидкости

Исследования также проводились со сменными втулками вала из стали 40X13 с величинами шероховатости  $Ra = 0,362 \text{ мкм}$ ;  $Ra = 8,028 \text{ мкм}$ . Сменные полюса изготовлены из стали 3 с величиной шероховатости  $Ra$  поверхности  $9,477 \text{ мкм}$  в рабочем зазоре [6, 7].

На рис. 7, 8 представлены зависимости моментов трения от величины шероховатости  $Ra$  (соответственно  $0,362 \text{ мкм}$  и  $8,028 \text{ мкм}$ ) поверхности втулки из стали 40X13 с применяемой магнитной жидкостью типа МКС 003–60 и постоянными магнитами типов ИЖКГ и ЕАЖИ с диаметрами 10, 15 и 20 мм. Исследования проводились с магнитными жидкостями типов МКС–003–60 и МКА–1–25 и постоянными магнитами:

- типа ИЖКГ из материалов ЮНДКТ5БА диаметром 10 мм с индукцией  $\geq 0,5$  (Тл) и коэрцитивной силой  $\geq 120$  (кА/м);

- типа ЕАЖИ из материала феррита стронция диаметром 15 мм с индукцией  $\geq 0,3$  (Тл) и коэрцитивной силой  $\geq 158$  (кА/м);

- типа ИЖКГ из материала феррит стронция диаметром 20 мм с индукцией  $\geq 0,3$  (Тл) и коэрцитивной силой  $\geq 185$  (кА/м).

На рис. 9, 10 показаны зависимости моментов трения от величины шероховатости  $Ra$  (соответственно  $0,362 \text{ мкм}$  и  $8,028 \text{ мкм}$ ) поверхности втулки из стали 40X13 с применяемой магнитной жидкостью типа МК 1–25 и магнитами типов ИЖКГ и ЕАЖИ с диаметрами 10, 15 и 20 мм.

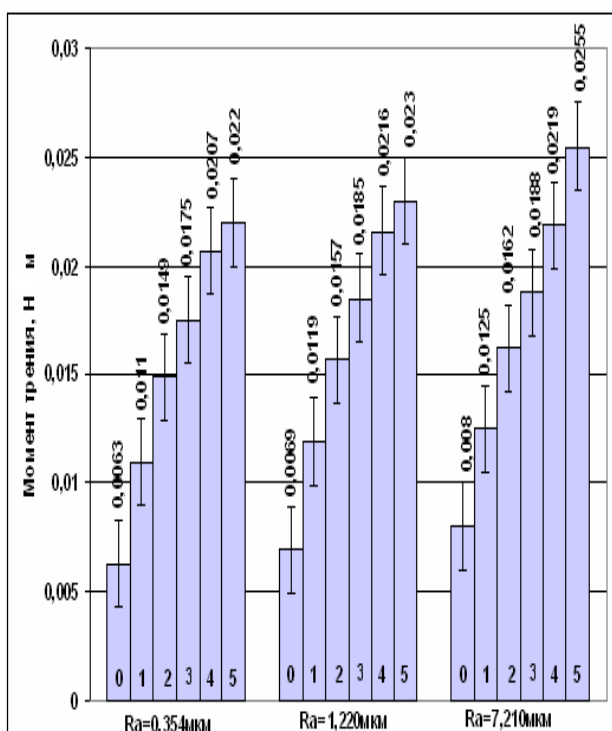


Рис. 7. Зависимость моментов трения от величины шероховатости поверхности  $Ra$  втулки из стали 40X13. Тип магнитной жидкости – МКС 003–60; магниты типа ИЖКГ диаметром  $D = 10$  мм: 0 – без магнитной жидкости; 1 – частота вращения вала 556 об/мин; 2 – частота вращения вала 1146 об/мин; 3 – частота вращения вала 1739 об/мин; 4 – частота вращения вала 2331 об/мин; 5 – частота вращения вала 2897 об/мин

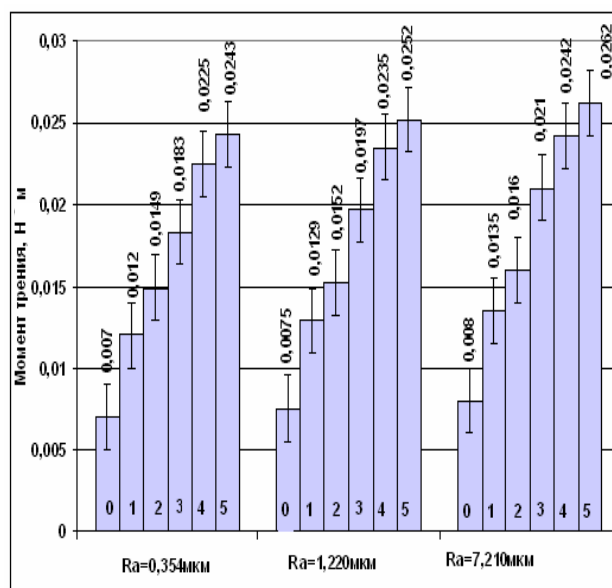


Рис. 8. Зависимость моментов трения от величины шероховатости поверхности  $Ra$  втулки из стали 40X13. Тип магнитной жидкости – МКС 003–60; магниты типа ИЖКГ диаметром  $D = 20$  мм: 0 – без магнитной жидкости; 1 – частота вращения вала 556 об/мин; 2 – частота вращения вала 1146 об/мин; 3 – частота вращения вала 1739 об/мин; 4 – частота вращения вала 2331 об/мин; 5 – частота вращения вала 2897 об/мин

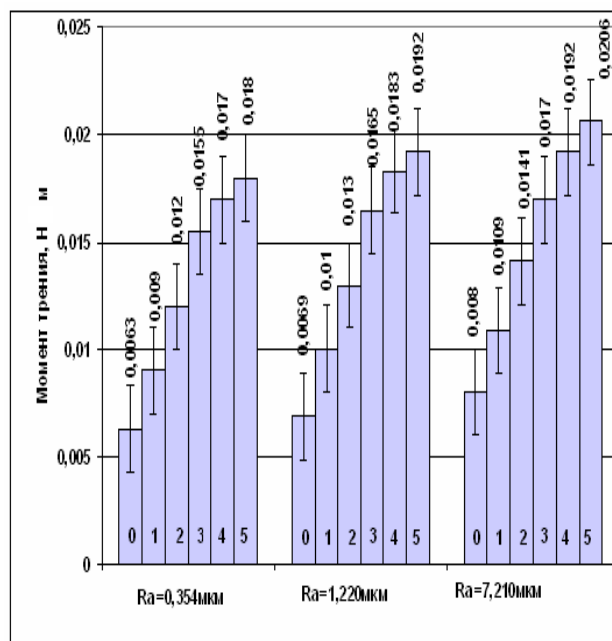


Рис. 9. Зависимость моментов трения от величины шероховатости поверхности  $Ra$  втулки из стали 40X13. Тип магнитной жидкости – МК 1–25; магниты типа ИЖКГ диаметром  $D = 10$  мм: 0 – без магнитной жидкости; 1 – частота вращения вала 556 об/мин; 2 – частота вращения вала 1146 об/мин; 3 – частота вращения вала 1739 об/мин; 4 – частота вращения вала 2331 об/мин; 5 – частота вращения вала 2897 об/мин

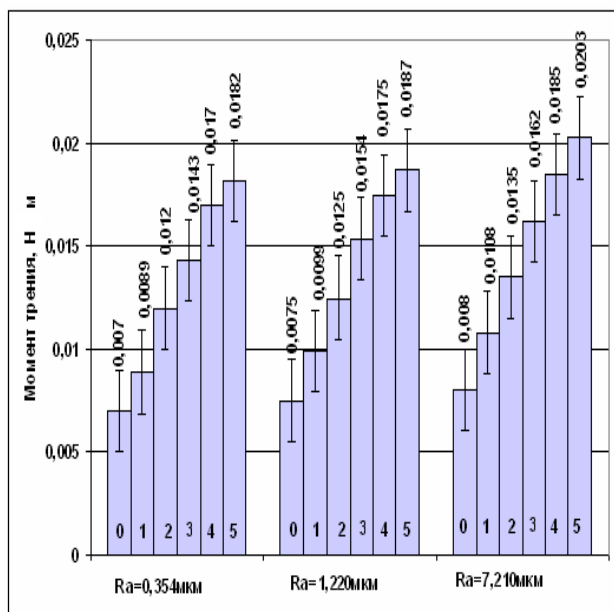


Рис. 10. Зависимость моментов трения от величины шероховатости поверхности  $Ra$  втулки из стали 40Х13. Тип магнитной жидкости – МК 1–25; магниты типа ИЖКГ диаметром  $D = 20$  мм: 0 – без магнитной жидкости; 1 – частота вращения вала 556 об/мин; 2 – частота вращения вала 1146 об/мин; 3 – частота вращения вала 1739 об/мин; 4 – частота вращения вала 2331 об/мин; 5 – частота вращения вала 2897 об/мин

Анализ полученных данных показывает, что чем выше величина шероховатости  $Ra$  поверхности втулки, контактирующей с магнитной жидкостью в магнитном поле, тем значительнее момент трения во всем диапазоне исследования скорости вращения вала от 500 до 3000 об/мин.

### Заключение

В результате проведенных экспериментов выявлено, что момент трения магнитожидкостных устройств зависит от величины шероховатости поверхностей полюсов и втулки, контактирующих с магнитной жидкостью разного типа.

*Полетаев Владимир Алексеевич*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии машиностроения,  
телефон (4932) 26-97-72,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
e-mail: poletaev@tam.ispu.ru

*Арефьев Игорь Михайлович*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат химических наук, старший научный сотрудник,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
e-mail: tatyana\_arefyeva@mail.ru

### Список литературы

1. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 356 с.
2. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
3. Арефьев И.М., Арефьева Т.А., Казаков Ю.Б. Метод определения коллоидальной стабильности магнитных жидкостей по результатам измерений вязкостных и магнитных свойств в процессе коагуляции и повторной пептизации // XIV Междунар. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. Плес, Россия. 7–10 сентября 2010. – Иваново, 2010. – С. 114–118.
4. Полетаев В.А., Перминов С.М., Пахолкова Т.А. Роль площадки на острие зуба в формировании магнитного поля и удерживающей способности рабочего зазора магнито-жидкостного уплотнения // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 32–34.
5. Перминов С.М., Полетаев В.А., Пахолкова Т.А. Исследование магнитного поля в рабочем зазоре с шероховатой магнитопроводящей поверхностью трения электро-механического устройства // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 2. – С. 36–39.
6. Полетаев В.А., Пахолкова Т.А. Исследование моментов трения в рабочем зазоре герметизаторов при использовании разных типов магнитных жидкостей // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 35–39.
7. Полетаев В.А., Пахолкова Т.А., Перминов С.М. Исследование влияния величины шероховатости поверхности деталей рабочего зазора на момент трения магнито-жидкостного устройства // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 5. – С. 32–36.

### References

1. Rozentsveyg, R. *Ferrohidrodinamika* [Ferrodynamics]. Moscow, Mir, 1989. 356 p.
2. Berkovskiy, B.M., Medvedev, V.F., Krakov, M.S. *Mag-nitnye zhidkosti* [Magnetic Fluids]. Moscow, Khimiya, 1989. 240 p.
3. Arefev, I.M., Arefeva, T.A., Kazakov, Yu.B. Metod opredeleniya kolloidal'noy stabil'nosti magnitnykh zhidkostey po rezul'tatam izmereniy vyazkostnykh i magnitnykh svoystv v protsesse koagulyatsii i povtornoy peptizatsii [Method of magnetic liquid colloidal stability definition based on the results of measuring viscous and magnetic properties in the course of coagulation and repeated peptization]. *Sbornik nauchnykh trudov XIV Mezhdunarodnoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Collected Papers of the XIV<sup>th</sup> International Conference on Nanodispersed Magnetic Fluids]. Ivanovo, 2010, pp. 114–118.
4. Poletaev, V.A., Perminov, S.M., Pakholkova, T.A. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 32–34.
5. Perminov, S.M., Poletaev, V.A., Pakholkova, T.A. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 2, pp. 36–39.
6. Poletaev, V.A., Pakholkova, T.A. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 35–39.
7. Poletaev, V.A., Pakholkova, T.A., Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 5, pp. 32–36.

*Казакое Юрий Борисович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Пахолкова Татьяна Александровна,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
соискатель кафедры технологии машиностроения,  
телефон (4932) 26-97-73,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
e-mail: tanurah@mail.ru